

Teoretický základ monitoringu rádioaktivity a radiačnej ochrany

V dobe prudkého rozvoja využitia zdrojov ionizujúceho žiarenia a atómovej energie po druhej svetovej vojne vznikla aj potreba chrániť obyvateľov a pracovníkov pred jeho negatívnymi účinkami.

Teoretické základy interdisciplinárneho odboru „**Ochrana pred žiarením**“ vychádzajú z biofyziky. Nezastupiteľne mu pripadá kompetencia na posudzovanie zdravotných dôsledkov ožiarenia ľudí. Z poznatkov o vzťahu dávky a účinku žiarenia sa vyjadruje k prijateľnosti alebo neprijateľnosti ožiarenia ľudí pri využití zdrojov ionizujúceho žiarenia v hospodárstve, zdravotníctve, vo výskume.

V roku 1955 Valné zhromaždenie OSN vytvorilo výbor **UNSCEAR** (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), ktorého úlohou je poskytovať pomoc pri zvyšovaní povedomia a prehĺbovaní znalostí o zdrojoch, úrovniach a účinkoch expozície ionizujúcemu žiareniu.

Ochrana pred žiarením sa nezaobera iba ochranou človeka v pracovnom prostredí, ale aj v životnom prostredí. V súvislosti s rozvojom jadrovej energetiky sa vyvinula aj disciplína, ktorá sa zaoberá **jadrovou bezpečnosťou**. Je to inžiniersky smer, ktorý zaisťuje taký stav jadrovoenergetického zariadenia a takú schopnosť jeho obsluhy, aby sa zabránilo nekontrolovanému rozvoju štiepnej reťazovej reakcie a úniku rádioaktívnych látok do okolia.

Štátny dozor v oblasti ochrany zdravia obyvateľstva pred žiarením vykonáva u nás **Úrad verejného zdravotníctva SR**. Dozor nad jadrovoenergetickými zariadeniami je v kompetencii **Úradu jadrového dozoru**.

Na úvod treba vysvetliť rozdiel medzi ionizujúcim a neionizujúcim žiarením.

Ionizujúce žiarenie má dostatok energie (merané v elektrónvoltoch) na to, aby uvoľňovalo elektróny z atómov, čím zanecháva atómy elektricky nabité.

Neionizujúce žiarenie, ako sú rádiové vlny, viditeľné svetlo alebo ultrafialové žiarenie, takúto schopnosť nemá.

Ďalší text sa teda týka len ionizujúceho žiarenia.

Dnes sú naše poznatky o účinkoch zdrojov žiarenia už dosť bohaté, sústavne sa dopĺňajú a aktualizujú. Väčšina ľudí si uvedomuje využívanie zdrojov v jadrovej energetike alebo v lekárskejších aplikáciách. Už oveľa menej známe sú aplikácie rôznych jadrových technológií v priemysle, poľnohospodárstve, stavebníctve, výskume a mnohých iných odvetviach. Iste je pre mnohých prekvapujúce, že najväčšie expozícia je spôsobovaná prírodnými zdrojmi žiarenia, ktoré sú odjakživa

súčasťou životného prostredia a že najväčším prispievateľom k nej je využívanie žiarenia v medicíne. Okrem toho každodenná skúsenosť z využívania leteckej dopravy a pobyty v nevhodne izolovaných budovách v niektorých častiach sveta poukazujú na ďalšie možné nezanedbateľné príspevky k expozícii ľudí.

Obsah nasledujúcich častí:

- [Čo je ionizujúce žiarenie?](#)
- [Čo nám žiarenie môže spôsobovať?](#)
- [Kde sa môžeme so žiarením stretnúť?](#)
- [Priemerné radiačné expozície obyvateľov a pracovníkov.](#)

Čo je ionizujúce žiarenie

Rádioaktivita a žiarenie boli prítomné na Zemi dávno predtým ako na nej vznikol život. Boli prítomné v kozmickom priestore od vzniku vesmíru. Ľudstvo však objavilo tento základný, univerzálny fenomén až v posledných rokoch 19. storočia a stále sa ešte učí spôsobom jeho využitia.

História

V r. 1895 **Wilhelm Conrad Roentgen** objavil žiarenie, ktoré nazval X-lúče a ktoré mohlo byť použité na pohľad do vnútra ľudského tela. Tento pohľad bol predzvesťou lekárskeho využitia žiarenia, ktoré sa od tej doby stále rozširuje. Roentgenovi bola v roku 1901 udelená Nobelova cena za fyziku ako uznanie jeho mimoriadneho prínosu pre ľudstvo.

V roku 1896 objavil francúzsky fyzik **Henri Becquerel**, ktorý sa zaoberal fluorescenciou materiálov, že úlomky minerálu, ktorý obsahoval urán, zanechali stopy na fotografickej doske. Tento jav nazval **rádioaktivitou**, ktorá sa prejavuje tým, že energia z atómu sa uvoľňuje spontánne. Rádioaktivita je dnes meraná v jednotkách **becquerel (Bq)** nazvaných po tomto vedcovi.

Zanedlho potom mladá chemička **Marie Skłodowska-Curie** v týchto výskumoch pokračovala. Bola prvá, ktorá sa zaslúžila o rozšírenie pojmu rádioaktivita. V roku 1898 ona a jej manžel Pierre Curie objavili, že urán vydáva žiarenie, ktoré sa tajomne premieňa na iné prvky, z ktorých jeden nazvali **polónium** po rodnej krajine Marie Curie a ďalší nazvali **rádium**, teda „žiariaci“ prvok. Maria Curie dostala v roku 1903 spolu s Pierrom Curie a Henri Becquerelom Nobelovu cenu v odbore fyziky. Stala sa tak jej prvou ženskou nositeľkou. Ďalšiu Nobelovu cenu dostala v roku 1911 v odbore chémie.

Niektoré základné pojmy

Vedci skúmajú **atómové jadro**, snažia sa porozumieť hlavne jeho štruktúre- Vieme, že atómy majú malé pozitívne nabité jadro obklopené mrakom záporne nabitých elektrónov. Jadro predstavuje svojou veľkosťou len asi stotisícinu celého atómu, ale je tak hutné, že predstavuje prakticky úhrnnú hmotu atómu.

Jadro je všeobecne tvorené zhlukom častíc, **protónov** a **neutrónov**. Protóny majú kladný náboj. Neutróny žiadny elektrický náboj nemajú. Chemické prvky sú určované počtom svojich protónov a neutrónov v jadre (napr. bór má atóm s 5

protónmi, atóm uránu má 92 protónov). Prvky s rovnakým počtom protónov ale rozdielnym počtom neutrónov sa nazývajú **izotopy** (napr. urán 235 a urán 238 sa líšia tromi neutrónmi v jadre.) Atóm ako celok nemá normálne ani negatívny ani pozitívny náboj, pretože má rovnaký počet negatívne nabitých elektrónov ako pozitívne nabitých protónov.

Niektoré atómy sú prirodzene stabilné, iné nestabilné. Atómy s nestabilným jadrom, ktoré sa spontánne premieňajú a uvoľňujú energiu v podobe žiarenia, sa nazývajú **rádionuklidy**. Táto uvoľnená energia pôsobí na iné atómy a ionizuje ich. **Ionizácia** je proces, pri ktorom atóm získa kladný alebo záporný náboj v dôsledku straty alebo získania elektrónu. **Ionizujúce žiarenie** nesie takú energiu, že môže odtrhnúť elektróny z ich obežnej dráhy a vytvárať nabité atómy nazývané **ionty**. Vyžiarenie zoskupenia dvoch protónov a dvoch neutrónov je podstatou **premeny alfa**, vyžiarenie elektrónov je označované ako **premena beta**. Často nestabilný nuklid nesie také množstvo energie, že emisia častíc nestačí k jeho stabilizácii. Vydáva preto mocný výstup energie vo forme elektromagnetického vlnenia, teda fotónov, čo je podstata **žiarenia gama**.

Žiarenie X (Rtg žiarenie) je tiež elektromagnetické žiarenie ako žiarenie gama, ale jeho energia je nižšia. Môže byť generované umelo kedykoľvek je treba, čo je veľmi výhodné v priemyslových a lekárskejších aplikáciách.

Rádioaktívna premena a polčasy

Aj keď **nestabilita** je vlastná všetkým rádionuklidom, predsa niektoré sú nestabilnejšie ako iné. Napr. častice v jadre atómu uránu-238 (s 92 protónmi a 136 neutrónmi) sotva drží pohromade. Občas sa zhluk dvoch protónov a dvoch neutrónov odtrhne a opustí atóm ako alfa častica, čím premení uran-238 na thorium-234 (s 90 protónmi a 144 neutrónmi v jadre). Ale thorium-234 je rovnako nestabilné, premieňa sa však iným procesom. Vysiela vysoko energetické elektróny ako častice beta a mení tak jeden z neutrónov na protón. Vzniká tak atóm proaktínia-234 s 91 protónmi a 143 neutrónmi v jadre. To je zase ale nestabilné a mení sa na urán-234. Tento proces postupuje, až sa dôjde k zmene na atóm olova-206 s 82 protónmi a 124 neutrónmi, ktorý už zostáva **stabilný**. Existujú mnohé iné sekvencie podobných transformácií, alebo **rádioaktívnych premien**.

Doba, za akú sa akékoľvek množstvo nejakého nestabilného prvku premení na polovicu sa nazýva **polčas premeny**. Za jeden polčas sa z miliónu atómov v priemere 500 tisíc premení na niečo iné. Za ďalší polčas sa premení 250 tisíc atómov a tak to pokračuje, pokiaľ sa celé pôvodné množstvo nepremení

(nerozpadne). Bolo by treba 4,5 miliardy rokov, aby sa polovica pôvodného množstva uránu-238 premenila na svoj dcérsky produkt thorium-234. Tým sa vysvetľuje, prečo sa okolo nás vyskytuje pomerne málo rádionuklidov.

Jednotky žiarenia

Dnes vieme, že energia žiarenia môže poškodzovať živé tkanivo a že množstvo energie odovzdané živej hmote sa vyjadruje vo veličine **dávka**. Dávka žiarenia môže byť spôsobovaná ktorýmkoľvek rádionuklidom alebo radom rádionuklidov, ktoré buď zostávajú mimo objem tela alebo ho ožarujú zvnútra napr. po ich vdýchnutí alebo požití. Dávkové veličiny sú vyjadrované rôznymi spôsobmi v závislosti na tom, aký objem tela a ktoré jeho časti boli ožiarené, či bol ožiarený jednotlivец alebo väčšia skupina osôb a to vzťahu k trvaniu expozície (napr. akútne ožiarenie).

Množstvo energie ionizujúceho žiarenia pohltené v jednom kilogramy tkaniva sa nazýva **absorbovaná dávka** a je vyjadrená v jednotkách gray (Gy) podľa mena anglického fyzika a priekopníka rádiobiológie Harolda Greya.

Ale táto veličina nevystihuje úplnú predstavu o význame ožiarenia, pretože rovnaká dávka alfa žiarenia vyvolá omnoho väčšie poškodenie ako rovnaká dávka od beta častíc alebo gama žiarenia. Pre porovnanie významu absorbovaných dávok od rôznych typov žiarenia je treba dávku vážiť vzhľadom k jej *potenciálu spôsobiť rovnaký typ a mieru biologickej škody*. Takto vážená dávka sa nazýva **ekvivalentná dávka**, ktorá sa hodnotí v jednotkách zvaných sievert (Sv) pomenovaných podľa švédskeho vedca Rolfa Sieverta. Jeden sievert je 1000 milisievertov podobne ako jeden liter je 1000 mililitrov.

Je treba tiež ďalej uvážiť, že niektoré časti tela sú zraniteľnejšie ako iné. Napr. rovnaká ekvivalentná dávka vyvolá skôr rakovinu pľúc ako rakovinu pečene. Predmetom zvláštnej pozornosti sú potom reprodukčné orgány vo vzťahu k riziku dedičných následkov. Aby bolo možné porovnať dávky, keď sú ožiarené rôzne tkanivá a orgány, sú ekvivalentné dávky vážené tiež vo vzťahu k *rozličným častiam tela*. Výsledkom tohto váženia podľa vnímavosti jednotlivých tkanív a orgánov je veličina **efektívna dávka**, ktorá sa tiež vyjadruje v jednotkách sievert (Sv). Pritom efektívna dávka je ukazovateľom pravdepodobnosti vzniku nádorov či genetických zmien po ožarovaní malými dávkami a nie je teda určená k posudzovaniu ožiarenia dávkami vyššími.

Tento komplexný systém radiačných veličín je nutné pochopiť v ich vzájomnej väzbe. To potom umožňuje odborníkom radiačnej ochrany individuálne dávky

sústavne zaznamenávať a vzájomne porovnávať, čo je mimoriadne dôležité pre pracovníkov so zdrojmi žiarenia, teda tzv. **profesijné ožiarenia** (pracovníci jadrových elektrární, lekári, baníci, sprievodcovia v jaskyniach...). Doteraz sme hovorili iba o dávkach jednotlivcov. Ak spočítame dohromady všetky individuálne efektívne dávky, dostaneme výsledok, ktorý voláme **kolektívna efektívna dávka** alebo jednoduchšie kolektívna dávka a tá sa vyjadruje v man-sievertoch (man Sv). Napr. ročná kolektívna dávka celosvetovej populácie je viac ako 19 miliónov man Sv, čo odpovedá ročnej priemernej dávke 3 mSv na jednotlivca.

Prenikavosť ionizujúceho žiarenia

Stručne povedané, žiarenie môže mať podobu **toku častíc** (čo zahŕňa častice alfa, beta a neutróny) alebo **elektromagnetického vlnenia** (gama a X-žiarenie), obe s rôznymi hodnotami energie. Rôzne druhy vysielanej energie a typy častíc majú rôznu prenikavosť látkou, a preto majú aj rôzne účinky na živú hmotu.

Pretože **alfa častice** majú dva pozitívne nabité protóny a dva neutróny, sú medzi časticami nositeľmi najväčšieho náboja. S týmto väčším nábojom je spojená aj vyššia miera interakcie s okolitými atómami. Vyššia interakcia vedie k rýchlej strate energie častíc, čím sa znižuje prenikavosť alfa žiarenia, Alfa žiarenie môže byť zadržané napr. listom papiera.

Beta častice, ktoré sú tvorené negatívne nabitými elektrónmi, nesú menší náboj, a tak prenikajú v živom tkanive do hĺbky jedného až dvoch centimetrov.

Gama žiarenie a Rtg žiarenie (napr. Rtg sú mimoriadne prenikavé a prechádzajú všetkým, čo je menej hutné ako hrubá oceľová doska).

Umele produkované **neutróny** sú vysielané nestabilným jadrom a vedú k štiepeniu atómu alebo jadrovej fúzii. Neutróny sa vyskytujú tiež v prírode ako zložky kozmického žiarenia. Pretože neutróny sú častice elektricky neutrálne, majú pri prestupe látkou alebo živým tkanivom vysokú prenikavosť.

Čo nám môže žiarenie spôsobovať

Účinky žiarenia na živý organizmus pozorovali už jeho prví objavitelia na vlastnej skúsenosti. Henri Bequerel si spôsobil poškodenie kože spôsobené ampulkou rádia, ktorú si dal do vrečka.

Wilhelm Conrad Roentgen zomrel na rakovinu hrubého čreva v r. 1923. Maria Curie, ktorá bola vystavená žiareniu po celý svoj profesijný život, zomrela v r. 1934 na krvné onemocnenie.

Uvádza sa, že až do konca päťdesiatych rokov 20. storočia zomrelo v dôsledku expozície žiarením najmenej 359 radiačných pracovníkov (lekárov a iných bádateľov), ktorí si neboli vedomí nutnosti ochrany.

Nie je prekvapením, že tí, ktorí sa venovali lekárskeym aplikáciám ionizujúceho žiarenia, sa ako prví venovali aj vytváraniu **odporúčaní radiačnej ochrany pracovníkov**. V r. 1928 bol v rámci konania druhého medzinárodného kongresu rádiológov v Stockholme zriadený **Medzinárodný výbor ochrany pred lúčmi X a rádiom** a jeho prvým predsedom bol zvolený Rolf Sievert. Po druhej svetovej vojne – s ohľadom na nové spôsoby využívania žiarenia tiež v nelekárskych odboroch – bol výbor zmenený na **Medzinárodnú komisiu pre rádiologickú ochranu (ICPR)**. V roku 1955 Valné zhromaždenie OSN vytvorilo výbor **UNSCEAR** (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), ktorého úlohou je poskytovať pomoc pri zvyšovaní povedomia a prehĺbovaní znalostí o zdrojoch, úrovniach a účinkoch expozície ionizujúcemu žiareniu. Krátko po vytvorení UNSCEAR bol R. Sievert tri roky jeho predsedom.

S rastúcim vedomím rizika spojeného s radiačnou expozíciou sa stalo 20. storočie svedkom intenzívneho výskumu účinkov žiarenia na človeka a životné prostredie. Najdôležitejším vyhodnotením populačných skupín vystavených žiareniu je štúdia približne 86 500 osôb, ktoré prežili atómové bombardovanie v Hirošime a Nagasaki v r. 1945. Ďalšie spoľahlivé dáta pochádzajú z poznatkov zistených u lekárske ožiarených pacientov a u pracovníkov po havarijnom ožiení (napr. v elektrárni v Černobyle) a tiež z laboratórnych pokusov na zvieratách a z bunkových štúdií.

UNSCEAR vyhodnocuje čo najdôkladnejšie vedecké informácie o účinkoch ožiarenia ľudí a zložiek životného prostredia a zisťuje aké účinky môžu byť spojené s ožiením na rôznych úrovniach.

Ako už bolo uvedené, biologický význam radiačnej expozície závisí na dávke žiarenia (t.j. množstvo energie deponované v tkanive), jeho type a dobe, v ktorej

žiarenie pôsobilo. V tomto hodnotení UNSCEAR používa nasledovné **rozdelenie dávok na pásma**:

Vysoké dávky	> 1 Gy	Ťažké radiačné nehody (napr. Černobyl')
Stredné dávky	100 mGy až 1Gy	Pracovníci záchranných prác v Černobyle
Nízke dávky	10 mGy až 100 mGy	Viacfázová počítačová tomografia (CT)
Veľmi nízke dávky	< 10 mGy	Bežné Rtg snímky

Pásma dávok podľa UNSCEAR

Účinky na človeka

Viac ako sto rokov rádiologického výskumu od objavenia ionizujúceho žiarenia prinieslo množstvo informácií o biologických mechanizmoch, ktorými žiarenie pôsobí na zdravie. Je známe, že žiarenie vyvoláva prejavy na **bunkovej úrovni** – spôsobuje zánik buniek alebo bunky modifikuje spravidla priamym účinkom na vlákna DNA v chromozómoch. Ak je počet poškodených alebo usmrtených buniek dosť veľký, poškodia sa orgány alebo dokonca nastane smrť ožiareného organizmu. Ale môže vzniknúť aj iný typ poškodenia DNA, ktoré bunku neusmrť. Také poškodenie sa dokáže opraviť, ale ak sa to nepodarí, dochádza k zmene bunky známej ako mutácia bunky a tá sa prejaví dôsledkami v následných bunkových deleniach a v závere môže viesť k rakovine. Keď sa také poškodenie týka buniek prenášajúcich genetickú informáciu potomstvu, môže v jeho dôsledku dôjsť k dedičnému poškodeniu. Informácie o biologických mechanizmoch a o dedičných následkoch sa často získavajú z laboratórnych pokusov.

Na základe skutočnosti, že doba od ožiarenia k chorobným prejavom je v závislosti na ich type rôzna, definujú sa zdravotné účinky radiačnej expozície ako včasné (**deterministické**) alebo neskoré (**stochastické**). Včasné sa väčšinou rozpoznávajú zisťovaním klinických príznakov. Neskoré účinky – ako je napr. rakovina – len prostredníctvom epidemiologických štúdií spočívajúcich v zisťovaní

chorobných prejavov v populácii. Zvláštna pozornosť je ďalej venovaná zdravotným účinkom radiačnej expozície u detí a embryí a tiež dedičným prejavom.

Deterministické (včasné) účinky

Deterministické účinky sú vyvolané rozsiahlym poškodením (smrťou) buniek. Príkladom sú kožné popáleniny, strata vlasov a zhoršenie plodnosti. Tieto účinky sú charakteristické vysokým dávkovým prahom, ktorý musel byť prekročený krátku dobu pred chorobným prejavom. Intenzita účinku vzrastá pri prekročení prahu so stúpajúcou dávkou.

Jednorazové dávky väčšie ako **50 Gy** poškodia centrálny nervový systém tak závažne, že smrť nastane v priebehu niekoľkých dní.

Pri akútnych dávkach aj nižších ako **8 Gy** sa rozvíjajú príznaky nemoci z ožiarenia známe ako **akútny radiačný syndróm**, ktorý sa môže prejavovať pocitom nevoľnosti, zvracaním, hnačkami, črevnými kŕčmi, slinením, dehydratáciou, únavou, apatiou, letargiou, potením, horúčkou, bolesťami hlavy a poklesom krvného tlaku. Označenie akútne sa vzťahuje k zdravotným prejavom a lekárskeym problémom, ktoré sa týkajú bezprostredného obdobia po expozícii, na rozdiel od tých, kde sa dôsledky prejavujú až po dlhšom období. Postihnutí môžu zomrieť v priebehu prvého alebo druhého týždňa iba z dôvodov hrubého poškodenia a zlyhania žalúdka a črevného traktu. Menšie dávky nevyvolávajú také gastroenterologické poškodenie, ale vedú k úmrtiu v priebehu mesiacov spravidla pre poškodenie kostnej drene. Po ešte menších dávkach sa časove odsúva nástup chorobných prejavov a vyvolané účinky sú miernejšie. Asi polovica z tých, ktorí dostali dávku **2 Gy**, sú postihnutí zvracaním asi tri hodiny po ožiarení, ale také príznaky sa objavujú vzácné pri dávke pod 1 Gy. Našťastie v prípade, keď červená kostná dreň a ďalšie zložky krvotvorného systému sú zasiahnuté dávkami menšími ako 1 Gy, sa uplatní ich pozoruhodná regeneračná kapacita a dochádza k ich úplnému uzdraveniu – i keď pretrvávajú vyššie riziko leukémie v neskorších rokoch. Pokiaľ je zasiahnutá časť tela, zostáva nepoškodené dostatočné množstvo aktívnej kostnej drene, aby nahradilo jej straty. Pokusy na zvieratách napovedajú, že ak aspoň desatina celkovej aktívnej kostnej drene zostáva nepoškodená, je nádej na prežitie skoro stopercentná.

Skutočnosť, že žiarenie môže priamo poškodiť bunkovú DNA, je využívané v zámernej likvidácii malígnych buniek žiarením pri liečbe nádorov, teda v **radioterapii**. Celkové množstvo žiarenia aplikované v radioterapii závisí od typu a vývojovej fázy nádoru, ktorý má byť liečený. Typické dávky, ktoré sa aplikujú

v lokalizovaných nádoroch orgánov a tkanív (solid tumors) sú v cieľovom orgáne 20 – 80 Gy. Táto dávka aplikovaná jednorázovo by pacienta ohrozila. Preto v záujme neškodného priebehu liečby sa dávky žiarenia aplikujú v časovo rozložených frakciách max 2 Gy. Táto frakcionalizácia dovoľuje, aby sa bunky normálneho tkaniva regenerovali, kým nádorové bunky sú usmrtené, pretože sa u nich menej uplatňujú nápravné bunkové procesy.

Stochastické (neskoré) účinky

K **stochastickým účinkom** dochádza dlhú dobu po expozícii. Možno povedať, že od obdržaných dávok žiarenia závisí pravdepodobnosť ich výskytu. Usudzuje sa, že sú spôsobované modifikáciami genetického materiálu bunky v dôsledku jej radiačnej expozície. Príkladom neskorých účinkov sú lokalizované nádory alebo leukémie postihujúce ožiarené osoby alebo genetické prejavy postihujúce potomstvo ožiarených osôb. So stúpajúcou dávkou sa v populácii zisťuje stúpajúca početnosť ich výskytu, zatiaľ čo intenzita prejavov nie je ovplyvnená.

Epidemiologické štúdie majú pre poznanie neskorých účinkov radiačnej expozície veľký význam. Tieto štúdie používajú štatistické metódy, aby mohli porovnať výskyt zdravotných prejavov (napr. nádorov) v exponovanej a neexponovanej populácii. Ak je v exponovanej populácii zistený ich zvýšený výskyt, môže to byť dôsledok radiačnej expozície.

Najdôležitejšie dlhodobé sledovanie populácie vystavenej ožiareniu sú epidemiologické štúdie osôb, ktoré prežili atómové bombardovanie. Sú najobsiahlejšími štúdiami vôbec vzhľadom na to, že zahŕňajú veľké skupiny ľudí v podstate reprezentujúcich normálnu populáciu, ktorá obdržala široké spektrum dávok postihujúcich viac menej rovnomerne celé telo. Tiež odhady dávok u týchto ľudí sú celkom dobre známe. Do súčasnosti táto štúdia odhalila niekoľko sto rakovín navyše v porovnaní s nádormi, ktorých výskyt by sa bol očakával u neožiarených ľudí. Pretože mnoho ľudí, ktorí prežili atómové bombardovanie, ešte žije, štúdie pokračujú v záujme úplného zhodnotenia výsledkov.

Vzťah medzi dávkou žiarenia a účinkom

Keď chcel UNSCEAR súhrnne charakterizovať a zovšeobecňovať vzťah medzi dávkou žiarenia a zdravotnými účinkami, zdôraznil dôležitosť rozlíšenia medzi pozorovaním skutočne už vzniknutých zdravotných účinkov v exponovaných

populáciach a teoretickými predpoveďami možných budúcich účinkov. V oboch prípadoch je nutné vziať do úvahy všetky neistoty a nepresnosť, či už v meraní žiarenia, štatistických úvahách alebo iných podmienkach.

Pri súčasnom stave vedomostí môžu byť zdravotné účinky ožiarenia v prípade skorých prejavov (napr. kožné popáleniny) spoľahlivo prisúdené žiareniu iba vtedy, ak sa vyskytnú u jednotlivcov ožiarených vysokou dávkou nad **1 Gy**. Také dávky môžu nastať pri radiačných nehodách, ako tomu bolo pri záchranároch počas havárie v Černobyle alebo u pacientov chybné ožiarených pri rádioterapii.

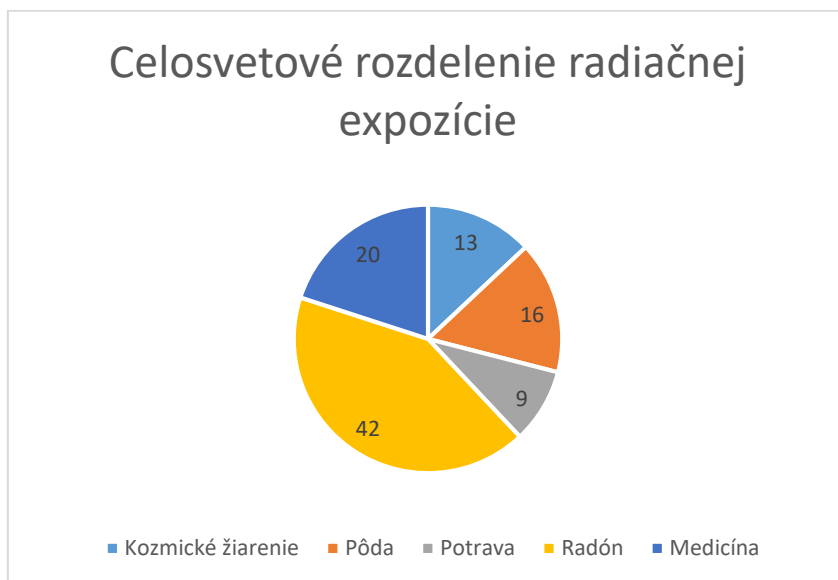
V epidemiologických metódach je možné pripísať vplyvu ožiarenia zvýšený výskyt neskorých (stochastických) účinkov napr. nádorov v populácii vystavenej miernemu stupňu dávok žiarenia iba vtedy, aj je pozorované zvýšenie natoľko významné, aby mohli byť prekonané všetky neistoty. Pritom platí, že v súčasnej dobe nie sú k dispozícii žiadne biomarkery, ktoré by mohli rozlíšiť, či konkrétne zistený nádor je alebo nie je vyvolaný ožiarením.

Keď dávka žiarenia bola nízka alebo veľmi nízka – čo je skôr charakteristické pri ožiarení ľudí v prírodnom prostredí alebo pri práci – zmeny pri výskyte neskorých účinkov na zdravie sa nedajú potvrdiť v dôsledku štatistických a iných neistôt. Pritom ale také účinky nemôžu byť ani vylúčené.

Ak ide o odhad zdravotných dôsledkov v budúcnosti, existuje celkom zhoda v tom, ako tieto odhady v pásme vysokých a miernych dávok robiť. Ale pre nízke a veľmi nízke dávky je nutné k stanoveniu pravdepodobnosti výskytu chorobných zmien zaviesť určité predpoklady a matematické modely, ale aj tak sa dospeje len k výsledkom veľmi neistým. V dôsledku toho UNSCEAR neodporučil používať v takýchto prípadoch pre hodnotenie budúcich zdravotných následkov alebo úmrtí takéto modely ako napr. hodnotenie neskorých následkov po havárii v Černobyle alebo Fukušime-Daiichi. Taký postup je neprijateľný. Napriek tomu pre účely porovnávania vo verejnom zdravotníctve alebo v radiačnej ochrane môže byť uskutočňovanie takýchto výpočtov užitočné, ale len za predpokladu, že sa zoberú do úvahy všetky neistoty a zdôrazní sa obmedzená platnosť takýchto postupov.

Kde sa môžeme so žiarením stretnúť

Všetci sme neustále ožarovaní z rôznych zdrojov. Všetky živočíšne a rastlinné druhy na Zemi vždy existovali a vyvíjali sa v prostredí, kde boli vystavené žiareniu z prírodného pozadia. Neskôr – vlastne až od začiatku 20. storočia – ľudia a iné organizmy boli exponovaní tiež umelými zdrojmi. Viac ako 80 % našej expozície je prirodzeného pôvodu a len asi 20 % pripadá na umelé zdroje – zvlášť z aplikácií v medicíne.



Prírodné zdroje žiarenia

Od vzniku Zeme je jej prostredie vystavené jednak žiareniu z kozmického priestoru, ale aj z rádioaktívneho materiálu obsiahnutého v zemskej kôre a zemskom jadre. Neexistuje možnosť ako sa vyhnúť expozícii z prírodných zdrojov, ktoré v skutočnosti spôsobujú najväčšiu expozíciu obyvateľstva našej planéty. Celosvetový priemer efektívnej dávky na hlavu je približne **2,4 mSv za rok** a kolíše v rozmedzí od 1 až do 10 mSv v závislosti na tom, kde ľudia žijú. V budovách môže z podlažia (z pôdy) hromadiť špecifický rádioaktívny plyn radón a aj samotný stavebný materiál môže obsahovať rádionuklidy, ktoré zvyšujú radiačnú expozíciu. Aj keď tieto zdroje sú prírodnej povahy, naša expozícia môže byť modifikovaná vlastnou voľbou, kde žijeme, čo jeme a pijeme.

Kozmické žiarenie

Kozmické žiarenie je významný prírodný zdroj vonkajšieho ožiarenia. Väčšina tohto žiarenia pochádza z hlbín kozmického priestoru, časť sa uvoľňuje zo slnka v priebehu jeho erupcií. Toto žiarenie ožaruje Zem priamo a vplyvom interakcií so zložkami atmosféry vytvára rôzne druhy žiarenia či rádioaktívneho materiálu. Je prevládajúcim zdrojom žiarenia vo vonkajšom priestore. Pretože zemská atmosféra a jej magnetické pole významne znižujú intenzitu kozmického žiarenia, sú niektoré časti Zeme ožiarené viac a niektoré menej. Kozmické žiarenie sa vychyluje magnetickým poľom severného a južného pólu, preto sú mu polárne oblasti vystavené viac ako rovníkové pásma.

Úroveň expozície ďalej stúpa s **nadmorskou výškou** a to v dôsledku toho, že vrstva vzduchu, ktorá tu pôsobí ako tienenie, sa s nadmorskou výškou zoslabuje. A tak ľudia žijúci na úrovni hladiny mora sú v priemere vystavení efektívnej dávke 0,3 mSv ročne, čo predstavuje 10-15 % ich celkovej dávky z prírodných zdrojov. Ľudia žijúci vo výške 2 000 m nad morom dostávajú niekoľkonásobok tejto dávky. Cestujúci v lietadlách môžu byť vystavení ešte väčším dávkam z kozmického žiarenia v závislosti na výške a trvaní letu. Napr. pri bežnej letovej výške môže priemerná efektívna dávka za dobu letu 10 h dosiahnuť 0,03 – 0,08 mSv. Inými slovami cesta New York – Paríž a späť spôsobí dávku okolo 0,05 mSv. To približne zodpovedá efektívnej dávke, ktorú pacient obdrží z bežnej Rtg snímky hrudníka. Aj keď odhad efektívnej dávky jednotlivého pasažiera pri jednom lete je nízky, kolektívna dávka môže byť vysoká vzhľadom k celosvetovo vysokému počtu pasažierov a letov.

Dávky z kozmického žiarenia sú významné pre osoby, ktoré trávajú v lietadle dlhšiu dobu ako piloti a stevardi, ktorých priemerné ročné dávky predstavujú 2-3 mSv. Dávky boli sledované aj na rôznych kozmických misiách. Zistené dávky sa pohybovali v rozmedzí 2-27 mSv v závislosti na aktuálnej aktivite Slnka. Kozmonaut počas 4-mesačného pobytu na Medzinárodnej kozmickej stanici, ktorá lieta okolo Zeme vo výške 350 km, dostane efektívnu dávku okolo 100 mSv.

Podzemné zdroje

Pôda

Čokoľvek sa vyskytuje na povrchu alebo vo vnútri Zeme obsahuje tzv. primordiálne rádionuklidy. Tieto rádionuklidy s extrémne dlhým polčasom premeny, ktoré sa nachádzajú v pôde – ako sú draslík-40, urán-238 a thorium-232 – spolu s rádionuklidmi vznikajúcimi ich premenou ako sú rádium-226 a radón-222, vysielali

svoje žiarenie skôr, ako sa Zem v súčasnej podobe vytvorila. UNSCEAR vypočítal, že celosvetovo každý človek je takto ožiarený v priemere efektívnou dávkou okolo 0,48 mSv, čo predstavuje súhrnnú vonkajšiu expozíciu z podzemných zdrojov.

Vonkajšie expozície sa významne líšia od miesta k miestu. Štúdie vo Francúzsku, Nemecku, Taliansku, Japonsku a USA ukazujú, že okolo 95 % ich populácie žije v oblastiach, kde priemerná ročná dávka z vonkajšieho prostredia kolíše medzi 0,3 a 0,6 mSv. Avšak v niektorých lokalitách týchto krajín môžu ľudia dostať až dávky vyššie ako 1 mSv ročne. Na svete však existujú aj miesta, kde radiačné expozície z terestriálnych zdrojov sú ešte vyššie. Napr. na juhozápadnom pobreží Keraly v Indii sa nachádza 55 km dlhé územie, husto zaľudnené, kde sú ľudia vystavení v priemere ročnej dávke 3,8 mSv. Je známe, že iné územia s vysokými hodnotami dávok z podzemných zdrojov sa vyskytujú v Brazílii, Číne, Iráne, na Madagaskare a v Nigérii.

Radón

Radón-222 je rádionuklid, ktorý ako plyn bežne uniká z pôdy. Je produktom rozpadového radu uránu-238 prítomného v horninách a pôdach Zeme. Po vdýchnutí sú niektoré krátkodobé rozpadové produkty radónu – osobitne polónium-218 a 214 – zachytávané v pľúcach a nimi uvoľňované alfa častice ožarujú bunky výstelky dýchacích ciest. Radón je teda základnou príčinou vzniku rakoviny pľúc u osôb vystavených vo zvýšenej miere inhalácii radónu a to u fajčiarov aj nefajčiarov. Fajčiari sú však zraniteľnejší v dôsledku interakcie medzi fajčením a expozíciou radónu.

Radón je prítomný všade v atmosfére, môže prenikať do budov netesnosťami v ich plášti a v obytných miestnostiach môže narastať jeho koncentrácia – t.j, aktivita definovaná ako počet rádioaktívnych premien za jednotku času v jednotkovom objeme. Osobitne, ak sú budovy vykurované a teplý vzduch stúpa do vyšších poschodí, kde uniká oknami a štrbinami, vzniká v dolných poschodiach podtlak. To má za následok „aktívne nasávanie“ radónu z podlažia štrbinami a netesnosťami konštrukcie (napr. okolo vstupov inžinierskych sietí z pivničných priestorov).

Celosvetový priemer koncentrácie radónu v budovách je asi 50 Bq/m³. Tento priemer však v sebe skrýva veľkú variabilitu hodnôt od miesta k miestu. Národné priemery objemovej aktivity radónu v obydliach (indoor radon) široko kolíšu od hodnôt nedosahujúcich ani 10 Bq/m³ na Cypre, v Egypte a na Kube k hodnotám vyšším ako 100 Bq/m³ v Českej republike, Fínsku a Luxembursku. V niektorých krajinách ako v Kanade, Švédsku a Švajčiarsku sa vyskytujú domy s koncentraciami medzi 1 000 až 10 000 Bq/m³. Podiel domov s takýmito

koncentraciami je však nízky. Medzi faktory, ktoré sú príčinou tejto variability, možno uviesť miestne geologické podmienky, priepustnosť pôdy, použitý stavebný materiál a spôsob vetrania budov.

Kľúčovým faktorom je vetranie, ktoré závisí na aktuálnej klíme. V budovách, ktoré sú dobre vetrané, ako je to v tropickom pásme, je nepravdepodobné, že by mohlo dôjsť k významnej kumulácii radónu. V miernom alebo studenom pásme, kde priestory bývajú menej vetrané, môžu koncentrácie radónu významne stúpať. Preto je potrebné pri navrhovaní energeticky úsporných budov zohľadniť prípadné dôsledky obmedzeného vetrania. V mnohých krajinách sa realizujú rozsiahle monitorovacie programy, ktoré sa stávajú podkladom pre zavádzanie opatrení znižujúcich koncentráciu radónu v budovách. V Európe povinnosť tzv. Akčného národného radónového programu vychádza z európskej legislatívy.

Koncentrácia radónu vo vode je obvykle veľmi nízka, ale niektoré zdroje – napr. hlbinné vrty v Helsinkách vo Fínsku, Hot Springs v Arkansase, USA – majú koncentrácie veľmi vysoké. Radón vo vode môže prispieť k zvýšeniu koncentrácie radónu vo vzduchu a to hlavne v kúpeľni pri sprchovaní. UNSCEAR však dospel k názoru, že priemerná ročná dávka z radónu požitého v pitnej vode je malá s porovnaním s príjmom vdychovaním. UNSCEAR tiež dospel k odhadu, že priemerná celková ročná dávka z radónu je 1,3 mSv, čo je polovica dávky, ktorú obyvateľstvo dostáva z prírodných zdrojov.

Na niektorých pracoviskách inhalácia plynného radónu je prevládajúcou zložkou radiačnej expozície pracovníkov. Radón je hlavným zdrojom radiačnej expozície pracovníkov v podzemných baniach všetkých typov. Priemerná ročná efektívna dávka u baníka v uhoľnej bani predstavuje 2,4 mSv, u ostatných baníkov okolo 3 mSv. V súhrne všetkých pracovníkov jadrového priemyslu predstavuje odhad priemernej ročnej efektívnej dávky na hlavu 1mSv, na čom sa najviac podieľajú baníci v uránových baniach.

Viac informácií o radóne je dostupných v materiáli Slovenskej zdravotníckej univerzity „Usmerňovanie ožiarovania obyvateľstva radónom v bytových priestoroch“, ktorý je prílohou tejto stránky. Nezahŕňa najnovšie legislatívne zmeny.

Zdroje v potravinách a v nápojoch

Potraviny a nápoje obsahujú niektoré primordiálne a niektoré iné rádionuklidy prevažne z prírodných zdrojov. Rádionuklidy môžu prechádzať do rastlín a odtiaľ do živočíšnych organizmov z hornín a minerálov prítomných v pôde a vode. Takto

spôsobované dávky veľmi kolíšu v závislosti na koncentrácii rádionuklidov v potravinách a vode a na miestnych výživových zvykoch.

Napr. u rýb a mäkkýšov je relatívne vysoká hladina olova-210 a polónia-210, a tak ľudia, ktoríedia vo veľkej miere morské živočíchy, obdržia väčšiu dávku ako ostatná populácia. Porovnateľné zvýšené dávky z potravín sa týkajú aj obyvateľov severských krajín, kde sa konzumuje veľké množstvo sobieho mäsa. Soby v arktických krajinách majú v tele relatívne vysoké koncentrácie polónia-210, ktoré konzumujú v lišajníkoch.

Podľa odhadu UNSCEAR predstavujú celosvetovo priemerné efektívne dávky z potravín a nápojov asi 0,3 mSv, zvlášť pre obsah draslíka-40 a prvkov rozpadového radu uránu-238 a thoria-232.

Popri rádionuklidoch z prírodných zdrojov môžu potraviny obsahovať tiež rádionuklidy zo zdrojov umelých. Tento príspevok je však obvykle veľmi malý.

Umelé zdroje žiarenia

Používanie zdrojov žiarenia sa významne rozšírilo v posledných desaťročiach, kedy sa vedci naučili využívať energiu atómu pre široké spektrum použitia od vojenských aplikácií k lekárskeym (napr. liečenie nádorov) a tiež od výroby elektrickej energie k aplikáciám v domácnosti (napr. požiarne detektory). Tieto a iné umelé zdroje znamenajú pre jednotlivca aj globálnu populáciu ďalšiu pridanú expozíciu k dávke z prírodných zdrojov.

Individuálne dávky z umelých zdrojov majú veľké rozpätie. Väčšina ľudí dostáva z týchto zdrojov relatívne malé dávky, ale sú i jednotlivci, ktorí obdržia niekoľkonásobok priemeru. Umelé zdroje sú väčšinou vplyvom opatrení radiačnej ochrany pod dobrou kontrolou.

Lekárske zdroje žiarenia

Využívanie ionizujúceho žiarenia v medicíne na diagnózu a liečbu určitých nemocí má tak významné postavenie, že je v súčasnosti ďaleko najväčším zdrojom ožiarenia na svete. V priemere zodpovedá za **98 %** ožiarenia zo všetkých umelých zdrojov a po prírodných zdrojoch je druhým najväčším prispievateľom k celosvetovej expozícii populácie, z ktorej predstavuje približne 20 %. Väčšina lekárskeho expozícií sa uskutočňuje v industrializovaných krajinách, kde sú využívané vo väčšom rozsahu. V niektorých krajinách to dokonca viedlo k ročným

priemerným dávkam z lekárskeho expozícií porovnateľných s dávkami z prírodného pozadia.

Prírodné zdroje	3,1 mSv
Celková lekárska expozícia	3 mSv
Z toho: - Intervenčná rádiológia	0,4 mSv
- Diagnostická rádiológia	0,3 mSv
- Nukleárna medicína	0,8 mSv
- CT	1,5 mSv
Všetky ostatné umelé zdroje	0,14 mSv

Priemerná efektívna dávka na jedného obyvateľa Spojených štátov amerických (2007)

Existujú podstatné a zreteľné rozdiely medzi lekárskou expozíciou a väčšinou ostatných expozícií. Lekárska expozícia postihuje len určitú časť tela, kým ostatné expozície sú často celotelové. Navyše vekové rozdelenie sa prikláňa k starším ročníkom. Dávky spôsobené lekárske expozíciami sa musia posudzovať s ohľadom na pravidlo, že *zdravotný prínos pre pacienta musí byť vyšší ako riziko, ktorému je z dôvodu expozície vystavený*.

Rozvoj urbanizácie spolu s postupným zlepšovaním životných podmienok nevyhnutne znamená aj lepší prístup k zdravotníckej starostlivosti. V dôsledku toho dávky obyvateľstva z lekárskeho expozícií celosvetovo neustále rastú. UNSCEAR pravidelne sústreďuje informácie o diagnostických a liečebných procedúrach. V období rokov 1997-2007 sa na celom svete ročne vykonalo 3,6 miliardy lekárskeho rádiologických výkonov, čo pri porovnaní s 2,5 miliardami v predchádzajúcom období 1990 – 1996 znamená nárast takmer o 50 %.

Hlavné kategórie lekárskej praxe, ktoré používajú zdroje žiarenia, sú Rtg diagnostika (vrátane intervenčných výkonov), nukleárna medicína a rádioterapia.

Diagnostická rádiológia

Spočíva v analýze obrazov získaných s použitím X-žiarenia, ako je jednoduchá rádiografia (napr. snímok hrudníka alebo zubov), skiaskopia (s kontrastnou látkou) alebo počítačová tomografia (CT). Zobrazovacie metódy používajúce neionizujúce žiarenie ako je ultrazvuk alebo tomografia pomocou magnetickej rezonancie UNSCEAR nehodnotí. **Intervenčná rádiológia** používa čo najmenej invazívnych

výkonov pri ich súčasnom sledovaní a to k diagnostike alebo liečbe onemocnení (napr. zavedenie cievneho katétru).

V dôsledku širokého využívania CT spojeného s významnou dávkou na jedno vyšetrenie sa celosvetová priemerná efektívna dávka spojená s diagnostickými rádiologickými výkonmi takmer zdvojnásobila z hodnoty 0,35 mSv v roku 1988 na 0,62 mSv v roku 2007. Podľa posledného UNSCEAR prehľadu zodpovedá **CT skenovanie za 43 % celosvetovej kolektívnej dávky z rádiologických procedúr**. Táto hodnota sa však mení z miesta na miesto. Asi dve tretiny zo všetkých rádiologických výkonov sa realizuje v 25 % svetovej populácie žijúcej v priemyslových krajinách. U zostávajúcich 75 % svetovej populácie sa ročný počet rádiologických výkonov v podstate nemení, vrátane jednoduchých zubných Rtg snímok.

Nukleárna medicína

Spočíva v zavedení otvorených žiaričov (t.j. rozpustných a teda neuzatvorených, nezapuzdrených) do tela, najčastejšie za účelom získania obrazu informujúceho o štruktúre alebo funkcii orgánu, menej často za účelom liečby určitých nemoci, ako je napr. zvýšená funkcia alebo rakovina štítnej žľazy. Spravidla je rádionuklid upravený tak, aby mohol byť podaný ako **rádiofarmakum** do žily alebo orálne. Rádiofarmakum potom putuje v tele a ukladá sa do tkanív a orgánov podľa svojej fyzikálnej a chemickej charakteristiky. Žiarenie vysielané rádionuklidom vo vnútri tela sa analyzuje, aby sa získalo diagnostické zobrazenie alebo sa využíva jeho schopnosť liečiť.

Počet diagnostických vyšetrení stúpol na celom svete z približne 24 miliónov v roku 1988 na 33 miliónov v roku 2007. To sa odrazilo na výraznom zvýšení ročnej kolektívnej dávky zo 74 000 na 202 000 man Sv. Počty terapeutických aplikácií v modernej nukleárnej medicíne rovnako rastú. Každoročne je na celom svete liečené približne 0,9 milióna pacientov. A opäť aj použitie nukleárnej medicíny vo svete je veľmi nerovnomerné, 90 % vyšetrení sa robí v rozvinutých priemyselných krajinách.

Rádioterapia

Využíva žiarenie na liečbu rôznych nemoci, osobitne rakoviny, ale niekedy aj nezhubných nádorov. Vonkajšia rádioterapia sa rozumie liečba pacienta s použitím zdroja žiarenia, ktorý je umiestnený mimo tela pacienta. Na to sa používa zariadenie obsahujúce vysoko **rádioaktívny zdroj** (obvykle kobalt-60) alebo **vysokonapäťové prístroje** (napr. lineárny urýchľovač) vysielajúci zväzok žiarenia. Existuje tiež

spôsob liečby spočívajúci v krátkodobom priložení alebo aj v trvalom umiestnení kovových rádionuklidových žiaričov alebo uzatvorených rádionuklidových žiaričov na chorobné ložisko (**brachyterapia**).

V celosvetovom meradle bolo v období 1997-2007 rádioterapeuticky liečené odhadom 5,1 milióna pacientov, čo je výrazný nárast oproti roku 1988, kedy to bolo 4,3 milióna pacientov.

Pretože celkový počet lekárskeho rádiologického výkonov v posledných dekádach výrazne stúpol, týka sa podobný nárast aj počtu lekárskeho pracovníkov, ktorí sú vystavení riziku žiarenia. Ich počet sa odhaduje na 7 miliónov. V intervenčnej rádiológii a nukleárnej medicíne môže byť personál vystavený dávkam vyšším ako zodpovedá priemeru.

Jadrové zbrane

V r. 1945 v poslednej fáze druhej svetovej vojny boli na japonské mestá Hirošima a Nagasaki zhodené **atómové bomby**, 6.8. na Hirošimu a 9.8. na Nagasaki. Výbuchy týchto bômb zabili približne 130 000 ľudí. Tieto udalosti zostávajú jedinými prípadmi vojnového použitia jadrových zbraní v histórii. Po r. 1945 bolo v atmosfére vykonané **veľké množstvo testovacích jadrových výbuchov**, zvlášť na severnej pologuli. Najaktívnejšie obdobie testovania spadá do dekády **1952 – 1962**, posledné do začiatku rokov osemdesiatych. Ľudia na celom svete boli v dôsledku týchto pokusov vystavení dávkam žiarenia. Práve ako odozva na tento stav bolo vytvorenie výboru OSN UNSCEAR v roku 1955.

Odhad priemerných ročných efektívnych dávok spôsobených globálnym spadom z jadrových pokusov v atmosfére bol **najvyšší v roku 1963** a predstavoval 0,11 mSv. Potom začali postupne klesať až k dnešnej hodnote 0,005 mSv za rok. Táto expozícia bude naďalej klesať veľmi pomaly, lebo väčšina podielu tejto expozície sa pripisuje uhlíku-14, rádioizotopu s dlhým polčasom rozpadu.

Až 50 % celkového spadu spôsobeného testami na povrchu Zeme sa uložil lokálne v okruhu 50 km od miesta testu. Ľudia žijúci blízko testovacích plôch boli tak vystavení predovšetkým lokálnemu spadu. Keďže testy sa robili väčšinou v odľahlých oblastiach, miestne populácie boli málopočetné. Ale i tak ľudia žijúci v stope prevládajúcich vetrov oblastí obdržali dávky vyššie ako zodpovedá priemeru.

Prvá správa UNSCEAR položila vedecké predpoklady, na ktorých bola dojednaná **Zmluva o čiastočnom zákaze pokusov jadrových zbraní v atmosfére, vesmíre a pod vodou**. Po podpísaní tejto zmluvy v r. **1963** bolo každoročne až do r. 1990

urobené ešte 50 podzemných testov za rok. A ešte aj potom sa niekoľko takých testov uskutočnilo. Väčšina týchto testov mala však oveľa menšiu výťažnosť ako skúšky v atmosfére a rádioaktívne častice boli obvykle zachytené v podzemí, pokiaľ nedošlo k ich úniku do atmosféry. Ale aj to sa stávalo. Rádioaktívny materiál z týchto pokusov zostáva v podzemných priestoroch.

Existujú však obavy z opätovného využívania oblastí jadrových testov (napr. ako pastviny pre dobytok alebo orná pôda), pretože niektoré z týchto oblastí sa začínajú osídľovať. Dávky z rádioaktívnych rezíduí na niektorých miestach testovacích plôch môžu byť významné

Jadrové reaktory

Keď sú niektoré izotopy uránu alebo plutónia zasiahnuté neutrónmi, ich jadro sa rozštiepi na dve malé jadrá procesom nazývaným **jadrové štiepenie**, pritom sa uvoľní energia a dva alebo viac neutrónov. Uvoľnené neutróny môžu tiež zasiahnuť iné jadrá uránu alebo plutónia, rozštiepiť ich, uvoľniť ďalšie neutróny, ktoré opäť môžu zasiahnuť viac jadier. To je podstata **reťazovej reakcie**. Tieto izotopy sú normálne využívané ako palivo jadrových reaktorov, kde je reťazová reakcia pod kontrolou a je možné ju zastaviť, ak začne prebiehať príveľmi rýchlo.

Energia uvoľnená štiepením v jadrových reaktoroch môže byť v jadrových elektrárňach využívaná na výrobu elektriny. Existujú však tiež **výskumné reaktory** pre testovanie jadrového paliva a rôznych druhov materiálov, pre výskumné práce v jadrovej fyzike, biológii alebo pre výrobu rádionuklidov používaných v medicíne a v priemysle. I keď existujú rozdiely medzi energetickými a výskumnými reaktormi, oba tieto typy sú závislé na technologických procesoch, ako je ťažba uránu a ukladanie rádioaktívneho odpadu.

Jadrové elektrárne

Prvá komerčná elektráreň na priemyselnej úrovni bola vybudovaná v r. **1956 v Calder Hall** v Spojenom kráľovstve a od tej doby sa výroba elektrickej energie v jadrových elektrárňach významne rozšírila. Aj keď vzrastá počet vyradení starších zariadení, výroba elektrickej energie v jadrových elektrárňach neustále stúpa. Koncom roka 2010 bolo v 29 krajinách v prevádzke 440 reaktorov v jadrových elektrárňach produkujúcich okolo 10 % celosvetovej výroby energie. Okrem toho v 56 krajinách bolo v prevádzke 240 výskumných reaktorov.

I keď výroba elektriny na princípe využitia jadrovej energie je často pokladaná za kontroverznú, prispieva pri normálnej prevádzke len malou mierou ku globálnej radiačnej expozícii. Okrem toho úroveň radiačnej expozície veľmi kolíše podľa typu zariadenia, rozdielov v jeho umiestnení a mení sa v priebehu času.

Celkové expozičné úrovne v dôsledku normálnych výpustí majú klesajúcu tendenciu, aj keď sa elektrický výkon elektrární zvyšuje. Je to spôsobené sčasti inováciami technológie a z časti aj prísnejšími opatreniami v radiačnej ochrane. Výpuste z elektrární vedú u obyvateľstva k veľmi nízkym dávkam žiarenia. Jednotlivec v populácii okolo jadrovej elektrárne je vystavený ročnej efektívnej dávke z výpustí iba na úrovni 0,0001 mSv.

Hlavnou zložkou radiačnej expozície z jadrovej energetiky je ťažba rádioaktívnych surovín. Ťažba a úprava uránovej rudy produkuje významné množstvá rezíduí v hlušine, ktorá obsahuje zvýšený obsah prírodných rádionuklidov.

Vyhorené jadrové palivo z reaktorov môže byť recyklované k získaniu uránu a plutónia k ďalšiemu využitiu (reprocessing). Väčšina vyhoreného paliva sa dnes uchováva v prechodných skladoch (medzi-skladoch) a do dnešnej doby bola recyklovaná len asi jedna tretina z tohto vysoko-rádioaktívneho odpadu.

Nízkoaktívne odpady a niektoré ďalšie odpady na hranici rizikovosti sa ukladajú do podzemných úložísk

V jadrovom priemysle tvoria hlavný príspevok k expozícii pracovníkov inhalačné expozície plyného radónu v uránových baniach. Ďalšou bežnou výrobnou fázou pre získanie kovového uránu je úprava rádioaktívnych rúd a vlastná extrakcia a separácia kovu, ktorý obsahuje vysoké koncentrácie rádionuklidov. Priemerná ročná efektívna dávka pracovníka v jadrovom priemysle sa postupne od 70. rokov 20. storočia znižuje z dávnejších 4,4 mSv/rok na dnešný 1 mSv/rok. Tento vývoj je daný výrazným poklesom ťažby uránu a pokročilejšími technológiami ťažby a vetrania v baniach.

Havárie v jadrových zariadeniach

Úrovne expozície v normálnej prevádzke civilných zariadení jadrového priemyslu sú veľmi nízke. Došlo však tiež k závažným nehodám, haváriam, ktoré vzbudili mimoriadnu pozornosť a ktoré UNSCEAR posúdil a vyhodnotil. Príkladom môže byť: nehoda výskumného reaktoru vo Vinci v bývalej Juhoslávii v r. 1958, únik rádioaktívnych látok z jadrovej elektrárne Three Mile Island v USA v r. 1979 a nehoda na zariadení na prepracovanie jadrového paliva v Tokai-Mura v Japonsku v r. 1999.

Najvážnejšia nehoda v civilných zariadeniach pred Černobyľom sa stala v Three Mile Island dňa 28.3.1979. Reťaz udalostí viedla k čiastočnému taveniu paliva reaktora. Pri nehode sa uvoľnilo veľké množstvo štiepných produktov a rádionuklidov z porušeného paliva reaktora do ochrannnej obálky (kontejnmentu), ale iba relatívne malé množstvo sa dostalo do okolia. Výsledná expozícia obyvateľstva bola veľmi malá.

Havária v jadrovej elektrárni Černobyľ

Nehoda v jadrovej elektrárni Černobyľ 26.4.1986 bola jednou z najzávažnejších v histórii civilných jadrových zariadení, ale tiež najvýznamnejšia čo sa týka ožiarenia širokej populácie. Kolektívna dávka z tejto havárie bola mnohonásobne vyššia ako súhrnná celková kolektívna dávka zo všetkých ostatných radiačných nehôd.

Dvaja pracovníci zahynuli bezprostredne v dôsledku konvenčného úrazu. U 134 sa postupne rozvinul akútny post-radiačný syndróm, ktorý bol pre **28 z nich fatálny**. Pre tých, čo prežili bolo hlavným zdravotným problémom poškodenie kože a neskôršie rozvoj zákalu očnej šošovky. Okrem záchranárov sa na likvidácii následkov havárie postupne zúčastnilo niekoľko sto tisíc osôb. Okrem zrejmeého zvýšenia výskytu leukémie a zákalov očnej šošovky u osôb ožiarených vysokými dávkami v rokoch 1986 a 1987 nie je možné v tejto skupine preukázateľne doložiť iné zdravotné poškodenia spôsobené ožiarením.

Havária spôsobila najväčší nekontrolovaný rádioaktívny únik do životného prostredia doteraz pozorovaný v civilnom sektore. Po dobu asi 10 dní unikalo do atmosféry veľké množstvo rádioaktívnych látok. Rádioaktívny mrak vytvorený nehodou sa rozptýlil po celej severnej pologuli a viedol k depozícii ohromného množstva rádioaktívneho materiálu na rozsiahlych územiach bývalého Sovietskeho zväzu a v iných častiach Európy. Kontaminoval pôdu a vodu hlavne v Bielorusku, Ruskej federácii a na Ukrajine a spôsobil sociálny a hospodársky rozvrat veľkých skupín obyvateľstva.

Kontaminácia čerstvého mlieka krátkodobým jódom-131 (s polčasom rozpadu 8 dní) a nedostatok okamžitých opatrení viedol na územiach bývalého Sovietskeho zväzu k vysokým dávkam v štítnej žľaze. A tak sa od počiatku 90. rokov 20. storočia zvýšil výskyt rakoviny štítnej žľazy u detí v Bielorusku, na Ukrajine a v piatich najviac postihnutých okresoch Ruskej federácie. V období medzi rokmi 1991-2005 sa zistilo viac ako 6000 takýchto prípadov, z nich 6 detí zomrelo.

Populácia ako celok bola exponovaná žiarením dlhšiu dobu a to jednak zvonka z rádioaktívneho spadu na pôdu, tak vnútorne z požívania kontaminovanej potravy a to osobitne v dôsledku cézia-137 (s polčasom rozpadu 30 rokov). I keď priemerné

individuálne efektívne dávky boli relatívne nízke, tak výsledná individuálna efektívna individuálna dávka za obdobie 1986-2005 predstavovala v kontaminovaných oblastiach Bieloruska, Ukrajiny a Ruskej federácie 9 mSv. Táto expozícia pravdepodobne nespôsobí zreteľné zdravotné účinky v obecnej populácii. Ale ťažký rozvrat vyvolaný nehodou mal závažné sociálne a hospodárske dôsledky a spôsobil veľkú psychickú nepohodu u obyvateľov zasiahnutých území.

UNSCEAR popísal a vyhodnotil rádiologické dôsledky havárie v niekoľkých svojich správach. Medzinárodné spoločenstvo venovalo neuveriteľné úsilie posúdeniu rozsahu havárie ako celku, tak i v rôznych oblastiach záujmu s cieľom prehĺbiť porozumenie rádiologických a iných následkov a asistovať pri ich náprave.

Záverom možno na podklade štúdií uskutočnených od r. 1986 konštatovať, že jednotlivci, ktorí v detskom veku boli exponovaní jódom-131, účastníci záchranných operácií a tí, ktorí sa zúčastnili likvidácie následkov havárie a obdržali vysoké dávky žiarenia, sú vystavení zvýšenému riziku zdravotných následkov vyvolaných ožiatením. Čo sa týka ostatného obyvateľstva oblasti, boli exponovaní nízkymi dávkami, ktoré sú porovnateľné s ročnými ožiateniami z prírodného pozadia alebo sú len jeho malým násobkom.

[Havária v Černobyle a Československo](#)

K 30. výročiu havárie v Černobyle usporiadal SHMÚ v spolupráci so SAV a ÚPN konferenciu, na ktorej odznelo množstvo zaujímavých príspevkov, ktoré sú obsahom zborníka. Na tejto stránke ponúkame so súhlasom autorov dva príspevky, ktoré sumarizujú výsledky meraní z obdobia havárie na území Československa a príspevkov pracovníkov SHMÚ k tomuto monitoringu:

[Monitorovanie radiačnej situácie v ČSSR po havárii v Černobyle a prijaté opatrenia pre ochranu obyvateľstva](#), H. Cabáneková, D. Nikodemová

[Aktivity SHMÚ pri riešení následkov havárie JE Černobyl' na území Československa](#), Š. Škulec

[Havária v jadrovej elektrárni Fukušima-Daiichi](#)

Pri veľkom zemetrasení vo východnom Japonsku 11.3.2011, ktoré dosiahlo 9. stupeň a vplyvom následného tsunami, ktoré postihlo východné pobrežie Japonska, bola ťažko zasiahnutá jadrová elektrárňa Fukušima-Daiichi a došlo k úniku rádioaktívnych látok do okolia. Asi 85 000 obyvateľov bývajúcich v okruhu 20 km od elektrárne a na niektorých priľahlých územiach bolo v rámci preventívnych opatrení v dňoch 11. až 15. marca evakuovaných. Pritom obyvatelia žijúci 20-30 km od elektrárne boli vyzvaní k úkrytu vo vlastných domoch. Neskôršie, v apríli 2011,

bola doporučená evakuácia ďalších 10 000 ľudí, žijúcich na severozápad od elektrárne z dôvodu zvýšených hodnôt rádionuklidov zo spadu na pôdu. Tieto evakuácie významne znížili hladinu expozície obyvateľov. V rámci realizovania opatrení v elektrárni bezprostredne po nehode boli exponovaní niektorí operátori a členovia záchranných jednotiek.

UNSCEAR uskutočnil odhady dávok žiarenia a ich účinkov na zdravie a životné prostredie. Na nápravných opatreniach a nadväzujúcich aktivitách v areáli elektrárne sa v priebehu 18 mesiacov po nehode podieľalo 25 000 pracovníkov. Priemerná efektívna dávka na jedného pracovníka predstavovala v tomto období asi 12 mSv. Pritom 6 pracovníkov presiahlo kumulatívnu dávku 250 mSv. Najvyššia zaznamenaná celková dávka u jedného pracovníka bola 680 mSv, ktorá bola z 90 % spôsobená vnútorným ožiarení. Dvanásť pracovníkov obdržalo vysokú dávku v štítnej žľaze v rozmedzí 2 až 12 Gy. Žiadne úmrtie spôsobené ožiarení ani žiadna akútna nemoc z ožiarenia sa u pracovníkov ožiarených v súvislosti s nehodou nezistili.

Priemerné efektívne dávky dospelých v evakuovaných oblastiach prefektúry Fukušima sa v období prvého roka po nehode odhadujú v rozmedzí 1-10 mSv. Efektívne dávky pre jednorôčnych dojčiat sa odhadujú približne na dvojnásobok. Pre tie časti prefektúry Fukušima, ktoré neboli evakuované a pre susedné prefektúry boli tieto dávky nižšie.

Odhady hornej hranice priemerných dávok v štítnej žľaze, predovšetkým z jódu-131, boli u dospelých 35 mGy, i dojčiat do jedného roka 80 mGy. Pre porovnanie možno uviesť bežné dávky z prírodného pozadia, ktoré sú typicky rádovo 1 mGy a podieľa sa na nich predovšetkým vonkajšie ožiarenie z prírodných rádionuklidov. UNSCEAR predpokladá teoretickú možnosť, že by sa rakoviny štítnej žľazy mohli vyskytnúť v skupine najviac ožiarených detí aj keď vzácné.

Pri porovnávaní havárie vo Fukušime s haváriou v Černobyle je na mieste uvážiť rozdiely v type reaktora, v podmienkach, za ktorých k nehode došlo, v odlišných charakteristikách rádionuklidov a ich rozptýlení a tiež rozdiely v prijatých opatreniach. V oboch prípadoch bolo do okolia uvoľnené veľké množstvo jódu-131 a cézia-137, dvoch najvýznamnejších rádionuklidov podieľajúcich sa na expozícii ľudí pri havárii jadrových reaktorov. Pri nehode vo Fukušime predstavoval únik jódu-131 asi 10 % a cézia-137 asi 20 % hodnôt odhadovaných pre haváriu v Černobyle.

Priemyselné a iné aplikácie

Zdroje ionizujúceho žiarenia sa využívajú v širokom spektre priemyselných aplikácií. Patrí sem:

- priemyselné ožarovanie zamerané na sterilizáciu zdravotníckych prípravkov a farmaceutických výrobkov,
- udržiavanie kvality potravín a to v snahe zlikvidovať zamorenie hmyzom, defektoskopická rádiológia skúmajúca kvalitu zvarov kovových dielov,
- alfa a beta žiariče sa používajú vo svetielkujúcich materiáloch v zameriavacích prístrojoch a ako zdroje orientačného osvetlenia východov a pod.,
- rádioaktívne zdroje alebo miniatúrne Rtg prístroje, ktoré sa používajú pri geologických vrtoch pri ťažbe minerálov, ropy, zemného plynu,
- rádioaktívne zdroje používané v priemysle na meranie hrúbky, vlhkosti, hutnosti a hladín,
- uzatvorené žiariče používané vo výskume.

Aj keď sú tieto aplikácie veľmi rozšírené, výroba rádionuklidov pre ich použitie v priemysle a lekárskej praxi spôsobuje len veľmi nízke expozície širokej verejnosti. Samozrejme v prípade nehôd môže dôjsť ku kontaminácii lokalizovaných plôch a vysokej expozícii prítomných osôb.

Rádioaktívne materiály prírodného pôvodu

Na svete existuje veľké množstvo pracovísk a zariadení, ktoré nemajú vzťah k jadrovej energetike, ale môžu spôsobovať expozíciu ľudí zvýšenou koncentráciou rádioaktívnych materiálov prírodného pôvodu (naturally occurring radioactive material – NORM) v ich priemyslových produktoch, vedľajších produktoch či odpadoch. Najvýznamnejšie z týchto zariadení sa týkajú ťažby a spracovania nerastov.

Aktivity spojené so získavaním a ďalším spracovaním rúd môžu tiež viesť k zvýšenej úrovni NORM. Tieto aktivity sa týkajú:

- ťažby a úpravy uránových rúd,
- ťažby a hutníctva kovov,
- výroby fosfátov,
- ťažby a spaľovania uhlia pre elektrárenský priemysel,
- vrtoch pre ťažbu ropy a zemného plynu,
- priemyselných prác so vzácnymi zeminami,
- keramického priemyslu
- a použitie iných rádionuklidov – typicky vybraných izotopov rádia a tória.

Napr. uhlie obsahuje stopy primordiálnych rádionuklidov. Spaľovanie uvoľňuje tieto rádionuklidy do životného prostredia, a tak touto cestou exponuje ľudí. Navyše elektrárenský popolček produkovaný ako zbytok po spálení uhlia, sa používa pri

zemných úpravách a stavbe komunikácií. Ak sa použije v stavebných materiáloch, spôsobuje radiačnú expozíciu vonkajším ožiarení, tak aj inhaláciou radónu. A ďalej ukladanie popolčeka na skládku spôsobuje zvýšenie radiačnej expozície v okolí skládky.

Využívanie geotermálnej energie je ďalším zdrojom expozície obyvateľstva. Budujú sa podzemné rezerváre pary a horúcej vody, aby zásobovali budovy elektrinou alebo aj teplom. Prispievajú tiež k radiačnej expozícii.

Vedľajším produktom obohacovania uránu je ochudobnený urán, ktorý je menej rádioaktívny ako urán prírodný. Ochudobnený urán sa roky využíva pre civilné aj vojenské účely. Vďaka svojej vysokej hustote je výhodný pre odtienenie žiarenia alebo ako vyvažovacia záťaž v lietadlách. Vojenské použitie ochudobneného uránu v projektiloch protitankových zbraní, hlavne pre vysokú prieraznosť, vyvoláva obavy zo zvyškovej kontaminácie. S výnimkou špecifických scenárov – napr. pri dlhodobom kontakte – sú radiačné expozície z ochudobneného uránu extrémne nízke. V skutočnosti je jeho chemická toxicita omnoho rizikovejším faktorom.

Predmety bežnej potreby

Veľa predmetov našej každodennej potreby obsahuje malé množstvo rádionuklidov, ktoré sú do nich zámerne pridávané pri výrobe pre svoje chemické alebo rádioaktívne vlastnosti.

Historicky najvýznamnejším rádionuklidom bolo z tohto pohľadu rádium-226 používané v luminiscenčných (svetielkujúcich) materiáloch používaných v bežných výrobkoch. Táto prax skončila pred niekoľkými desiatkami rokov, keď bolo rádium nahradené prométiom-147 a vodíkom-3 (trícium), ktoré sú menej rádiotoxické. Pri nosení náramkových hodínok obsahujúcich zlúčeniny trícia môže dochádzať k jeho úniku, lebo je veľmi prchavé. Trícium ale emituje iba veľmi slabé častice beta, ktoré nemôžu prechádzať pokožkou a môžu ožiariť človeka iba keď preniknú do tela.

Niektoré moderné požiarne hlásiče pozostávajú z ionizačných komôr s malými fóliami amerícia-241, ktoré produkuje alfa častice a vytvára tak stály prúd iónov. Okolitý vzduch má voľný prístup k citlivým častiam detektora a keď do detektoru vstúpi dym, prúd iónov sa preruší a spustí poplach. Rádioaktivita zdrojov amerícia je v týchto detektoroch veľmi nízka. Amerícium sa premieňa dlhým polčasom rozpadu okolo 432 rokov. To znamená, že detektor po dobe svojej životnosti – asi 10 rokov – zachová v podstate svoju pôvodnú aktivitu. Pokiaľ zostane amerícium vo vnútri prístroja, aktivita je zanedbateľná.

Nehody v priemysle

Nehody pri priemyslovom využívaní zdrojov žiarenia sú častejšie ako nehody v jadrových elektrárnach. Napriek tomu nevzbudzujú veľa pozornosti, aj keď môžu spôsobiť významné radiačné expozície, tak pracovníkom ako aj obyvateľom.

Nehody v priemysle majú rôzne príčiny a následky. Uvedme ako príklad dva:

V r. 1978 v Louisiane v USA jeden pracovník pri defektoskopii na lodi utrpel radiačné poškodenie ľavej ruky pri práci so zdrojom iridia-192 s aktivitou 3,7 TBq. Asi po troch týždňoch koža začervenela, opuchla a potom sa urobili pľuzgiere, ktoré sa hojili 5-8 týždňov. Po ďalších 6 mesiacoch však museli ukazovák ľavej ruky z časti amputovať.

Druhý prípad sa stal v r. 1990 v Šanghaji v Číne, keď sedem pracovníkov bolo ožiarených zdrojom kobaltu-60 v dôsledku nevyhovujúcich bezpečnostných opatrení. Jeden z nich bol ožiarený dávkou okolo 12 Gy zomrel na 25. deň po nehode. Ďalší s dávkou odhadnutou na 12 Gy zomrel na 90. deň po expozícii. Ostatných päť pracovníkov s dávkami v rozmedzí 2-5 Gy boli lekársky ošetrení a uzdravili sa.

Opustené zdroje

Príklad z rokov 1966 až 2007 uvádza, že 31 nehôd bolo spôsobených stratenými alebo ukradnutými zdrojmi, ktorým sa hovorí „opustené zdroje“ (**orphan sources**). Je známe, že tieto zdroje spôsobili smrť 42 ľuďom a to dospelým i deťom.

Nie je presne známe, koľko opustených zdrojov sa na svete vyskytuje, ale odhaduje sa to na tisíce kusov. Dozorný orgán USA (Nuclear Regulatory Commission) podal správu o tom, že v rokoch 1996-2008 sa stratilo 1500 rádioaktívnych zdrojov z čoho viac ako polovicu sa nikdy nepodarilo nájsť. V štúdii Európskej únie sa uvádza, že sa ročne stratí asi 70 zdrojov. Väčšina z nich nepredstavuje mimoriadne radiačné riziko, ale aj tak nehody, ktoré spôsobujú, sú hlavným problémom opustených zdrojov.

Uzatvorené žiariče alebo ich puzdrá môžu byť atraktívne pre ľudí, ktorí zbierajú a predávajú kovový odpad, lebo im pripadá, že by mohlo ísť o výrobky z cenného kovu a naviac, na niektorých z nich nie je varovný radiačný symbol. Prípady neobozretných zberateľov šrotu alebo náhodných občanov, ktorí sa zapletú do manipulácie s takýmto nálezom, vedú k vážnym poškodeniam zdravia a v niektorých prípadoch aj k úmrtiam, ako sa to stalo v Goianii v Brazílii v r. 1987. Na počiatku reťaze udalostí bola krádež opusteného terapeutického prístroja s vysokoaktívnym (50,9 TBq) zdrojom cézia-137. Nálezca porušil kovové

zapuzdrenie a rádionuklid sa uvoľnil vo forme prášku. V nasledujúcich dvoch týždňoch sa rozpustený prášok chloridu cézia rozptýlil v priestoroch zberne kovového šrotu a v okolitých domoch. Mnoho ľudí trpelo zdravotnými problémami a kožnými chorobnými zmenami. 110 000 ľudí bolo monitorované pre rádioaktívnu kontamináciu, mnoho z nich bolo vnútorne kontaminovaných céziom-137. Pri tejto nehode zomreli štyria ľudia, medzi nimi jedno dieťa.

Priemerná radiačná expozícia obyvateľov a pracovníkov

Z celkového prehľadu je zrejmé, že v radiačnej expozícii obyvateľov dominuje ožiarenie z prírodných zdrojov. Dve tretiny pripadajú na rádioaktívne látky vo vzduchu, ktorý dýchame, v potrave, ktorú jeme a vo vode, ktorú pijeme.

Hlavným zdrojom expozície z umelých rádionuklidov je používanie zdrojov žiarenia v medicíne. Lekárske expozície kolíšu podľa štátov, systémov zdravotnej starostlivosti. Priemerná ročná efektívna dávka z lekárskeho expozícií v priemyslových krajinách je 1,9 mSv a pre ostatné krajiny 0,32 mSv.

Priemerné expozície obyvateľov podľa zdrojov žiarenia

(zaokrúhlené odhady efektívnych dávok na jedného obyvateľa za rok – celosvetový priemer)

Prírodné zdroje	2,4 mSv	Umelé zdroje	0,65 mSv
- Potrava	0,29 mSv	- Jadrové elektrárne	0,0002 mSv
- Kozmické žiarenie	0,39 mSv	- Havária v Černobyle	0,002 mSv
- Pôda	0,48 mSv	- Spád z testov jadrových zbraní	0,005 mSv
- Radón	1,3 mSv	- Nukleárna medicína	0,03 mSv
		- Lekárska rádiológia (diagnostická)	0,62 mSv

Čo sa týka expozície pracovníkov, pozornosť sa od 90. rokov 20. storočia sústreďovala na umelé zdroje žiarenia. Dnes však vieme, že veľké množstvo pracovníkov je exponované prírodnými zdrojmi žiarenia, zvlášť v ťažobnom priemysle. U určitých povolání tohto sektoru prevláda inhalácia radónu. Hoci uvoľňovanie radónu v podzemných uránových baniach predstavuje podstatný podiel profesionálnej expozície, predsa len ročné priemerné efektívne dávky na jedného pracovníka klesli v jadrovom priemysle z hodnoty 4,4 mSv v rokoch sedemdesiatych na súčasnú hodnotu 1 mSv. Pre porovnanie ročná priemerná efektívna dávka na jedného baníka v uhoľnej bani je 2,4 mSv a u ostatných baníkov 3 mSv.

Súčasný odhad celosvetového počtu monitorovaných pracovníkov je asi 23 miliónov, z toho asi 10 miliónov je exponované umelými zdrojmi. Tri štvrtiny pracovníkov exponovaných umelými zdrojmi sú v zdravotníctve, kde ročná efektívna dávka na pracovníka je 0,5 mSv. Vyhodnotenie trendov priemernej ročnej efektívnej dávky na pracovníka ukazuje vzostup v expozíciách prírodnými zdrojmi, osobitne pri banských prácach a pokles expozície umelými zdrojmi, hlavne vďaka úspešným opatreniam v radiačnej ochrane.

Trendy v celosvetovej expozícii radiačných pracovníkov(mSv)

(odhady priemernej ročnej efektívnej dávky na jedného pracovníka za rok)

Zdroje	1970	1980	1990	2000
Prírodné zdroje				
Posádky lietadiel	-	3,0	3,0	3,0
Ťažba uhlia	-	0,9	0,7	2,4
Ťažba iných surovín (urán v jadrovom priemysle)	-	1,0	2,7	3,0
Rôzne	-	6,0	4,8	4,8
Celkom	-	1,7	1,8	2,9
Umelé zdroje				
Lekárske použitie žiarenia	0,8	0,6	0,3	0,5
Jadrový priemysel	4,4	3,7	1,8	1,0
Ostatný priemysel	1,6	1,4	0,5	0,3
Rôzne	1,1	0,6	0,2	0,1
Celkom	1,7	1,4	0,6	0,5

Literatúra

Klener a kol., V., 1987, Hygiena záření, Avicenum
 Cohen-Unger, S., Evrensel, A., 2016, Ionizující žiarenie – účinky a zdroje, Program OSN
 pre ochranu životného prostredia
 Dienstbier, Z., 2010, Hirošima a zrod atomového věku, Mladá Fronta